

## Моделирование переменных по времени и подвижных по конструкции нагрузок, вызванных газодинамическим воздействием двигательной установки ракеты космического назначения

# 02, февраль 2013

DOI: **10.7463/0213.0539497**

Бошняк В. А., Зверев В. А., Ульяненков А. В.

УДК 629.7.085

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

[zverev\\_vadim@mail.ru](mailto:zverev_vadim@mail.ru)

[yaboshrab@mail.ru](mailto:yaboshrab@mail.ru)

Для оценки несущей способности агрегатов стартового комплекса часто возникает необходимость рассматривать параметры их нагружения газодинамическим воздействием от струй двигательной установки (ДУ) ракеты космического назначения (РКН) при старте [1, 2]. Во многих случаях конструкция этих агрегатов представляет собой достаточно сложные пространственные фермы. Особую важность такой расчет приобретает для высоких конструкций, находящихся вблизи стартового стола, т.к. они нагружаются относительно большим воздействием, как по величине, так и по времени. К таким агрегатам относятся, в частности, опорные фермы, башни обслуживания, заправочные мачты и т.п. Пример таких агрегатов можно видеть в составе стартовой системы РКН семейства «Союз», приведенной на рис. 1.



Рис. 1. Стартовая система РКН «Союз»

Несущие конструкции агрегатов стартового комплекса представляют собой пространственные комбинированные системы с распределенными параметрами. Они содержат ферменные стержневые и листовые конструкции. Расчёты на прочность таких систем при наличии компьютерной техники и соответствующего программного обеспечения предпочтительнее осуществлять методом перемещений, при использовании метода конечных элементов (МКЭ) [3-8]. Физическая модель, созданная на основе МКЭ, представляет собой совокупность большого количества конечных элементов (КЭ), соединенных между собой в узлах. Такое моделирование предполагает представление нагрузления в виде узловых сил.

В качестве примера рассмотрим нагружение, вызванное скоростным напором струй ДУ при сносе РКН в сторону агрегата СК. Сложность задания параметров такого

нагружения состоит в том, что оно представляет собой переменное по времени и подвижное по конструкции воздействие. Такое воздействие в общем случае может быть представлено в виде суммы узловых сил приложенных к конечноэлементной модели агрегата:

$$\{Q(i,t)\} = \sum \{Q\}_j \cdot \varphi_j(t),$$

где  $\{Q\}_j$  - фиксированный вариант распределения нагрузок;

$\varphi_j(t)$  - соответствующая этому варианту скалярная функция времени, в соответствии с которой пропорционально изменяются все компоненты вектора  $\{Q\}_j$ .

В соответствии с принципами МКЭ и возможностями последующей автоматизации нагрузку, вызванную скоростным напором ДУ РКН, удобно определять на КЭ модели рассматриваемого агрегата, а затем приводить ее к узлам КЭ. Полная нагрузка на узел модели является суммой узловых нагрузок всех КЭ, сходящихся в этом узле. В свою очередь полные нагрузки на узел модели образуют вектор  $\{Q\}_j$ , соответствующий конкретному моменту времени воздействия.

Для каждого конечного элемента модели агрегата можно определить значение скоростного напора, действующего на него в конкретный момент времени. В качестве исходных данных можно использовать данные полей скоростного напора от струй ДУ, соответствующих различным высотам подъема РКН при движении по расчетной траектории. Примерный вид поля скоростного напора для некоторой высоты подъема ракеты приведен на рис. 2.

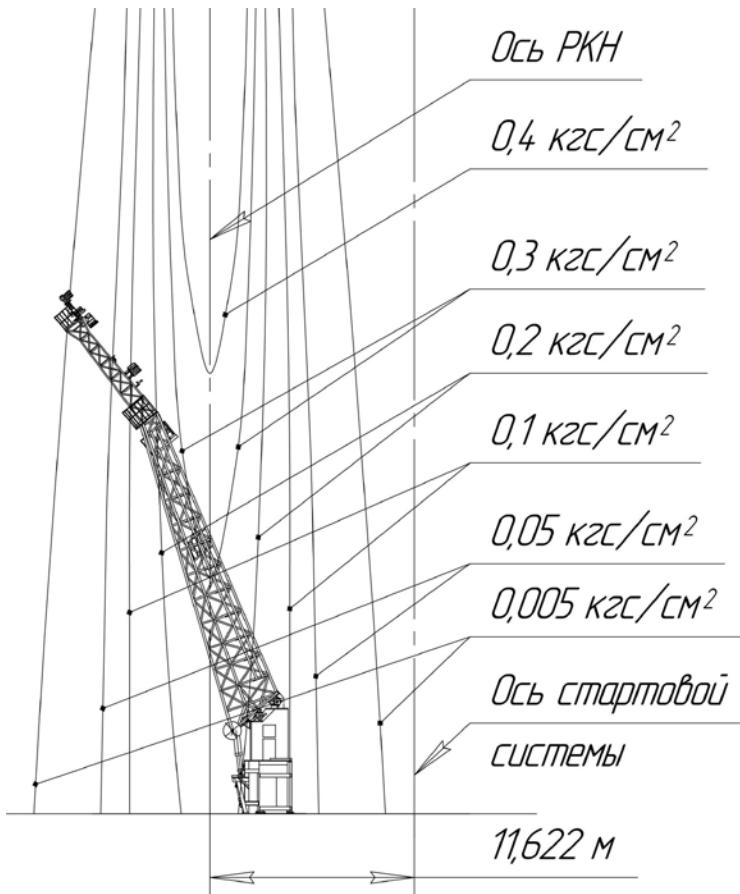


Рис. 2. Пример поля скоростного напора газодинамической струи ДУ РКН

Нагрузка на КЭ модели рассматриваемого агрегата стартового комплекса в соответствии с [9, 10] можно вычислить по формуле:

$$P_j = q_j \cdot C_{j\alpha} \cdot F_j \cdot K_D,$$

где  $q_j$  - скоростной напор от ДУ, действующий на  $j$ -ый элемент модели;

$C_{j\alpha}$  - аэродинамический коэффициент сопротивления, зависящий от ориентации стержня относительно скорости потока газа;

$F_j$  - наветренная площадь стержня;

$K_D$  - коэффициент, учитывающий динамическую составляющую воздействия.

Обычно его величина назначается исходя из опытных данных нагружения аналогичных конструкций.

Пример моделирования подвижной нагрузки по фрагменту конструкции приведен на рис. 3, 4. На рис. 3 показано перемещение зоны давления от подвижной струи ДУ в виде нагрузки в момент времени  $t_1$  и последующий момент  $t_2$ . На рис.4 приведено представление этих нагрузок в виде узловых сил на фрагмент конструкции. Моменту времени  $t_1$  соответствует вектор  $\{Q\}_k$ , а моменту  $t_2$  -  $\{Q\}_{k+1}$ . На интервале от  $t_1$  до  $t_2$  сумма

умноженных на соответствующие функции векторов плавно переходит от вектора  $\{Q\}_k$  к вектору  $\{Q\}_{k+1}$ , что соответствует перемещению зоны давления. Такой переход может быть смоделирован временными функциями  $\varphi_k(t)$  и  $\varphi_{k+1}(t)$ , приведенными на рис. 5.

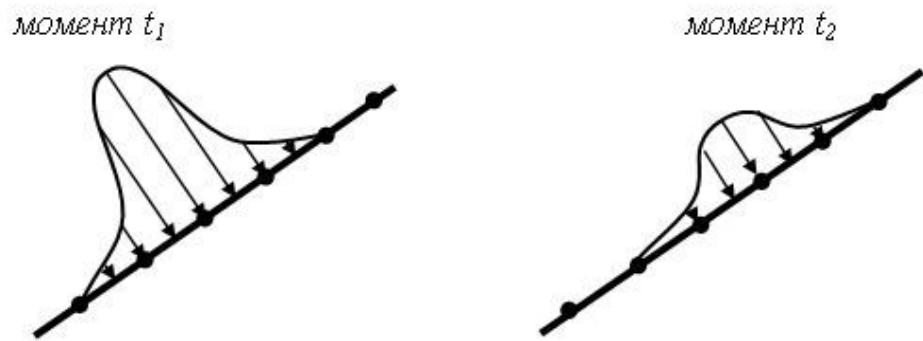


Рис. 3. Подвижная нагрузка

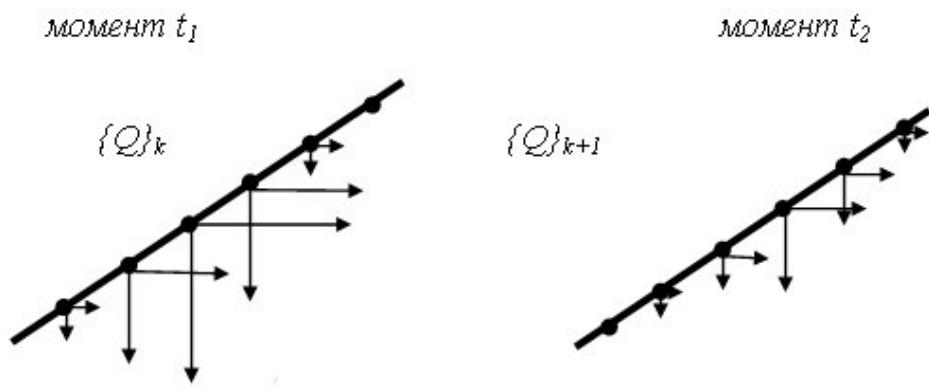


Рис. 4. Узловые нагрузки

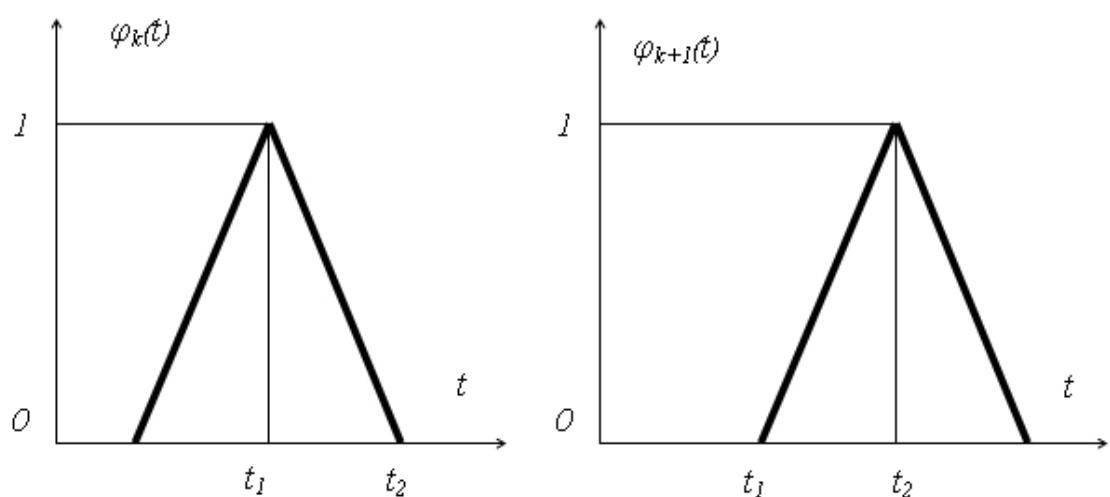


Рис. 5. Временные зависимости

При увеличении числа вариантов нагружения и соответствующих им временных функций можно смоделировать переменные по времени и по распределению по конструкции внешние силы с необходимой точностью. Предложенный подход может быть применен и для моделирования воздействия на пространственную конструкцию агрегатов стартового комплекса воздушных ударных волн с фазами отражения, погружения и обтекания, ветрового воздействия на выходящую из контейнера ракету, а также и других переменных по времени и месту приложения нагрузок.

В качестве примера рассмотрен расчет конструкции кабель-заправочной мачты (КЗМ) при действии газодинамической струи ДУ РКН «Союз -2» этапа 1в. Физическая модель конструкции КЗМ приведена на рис. 6. Модель создана на основе МКЭ и представляет собой пространственную ферму в виде соответствующего набора стержневых и пластинчатых КЭ.

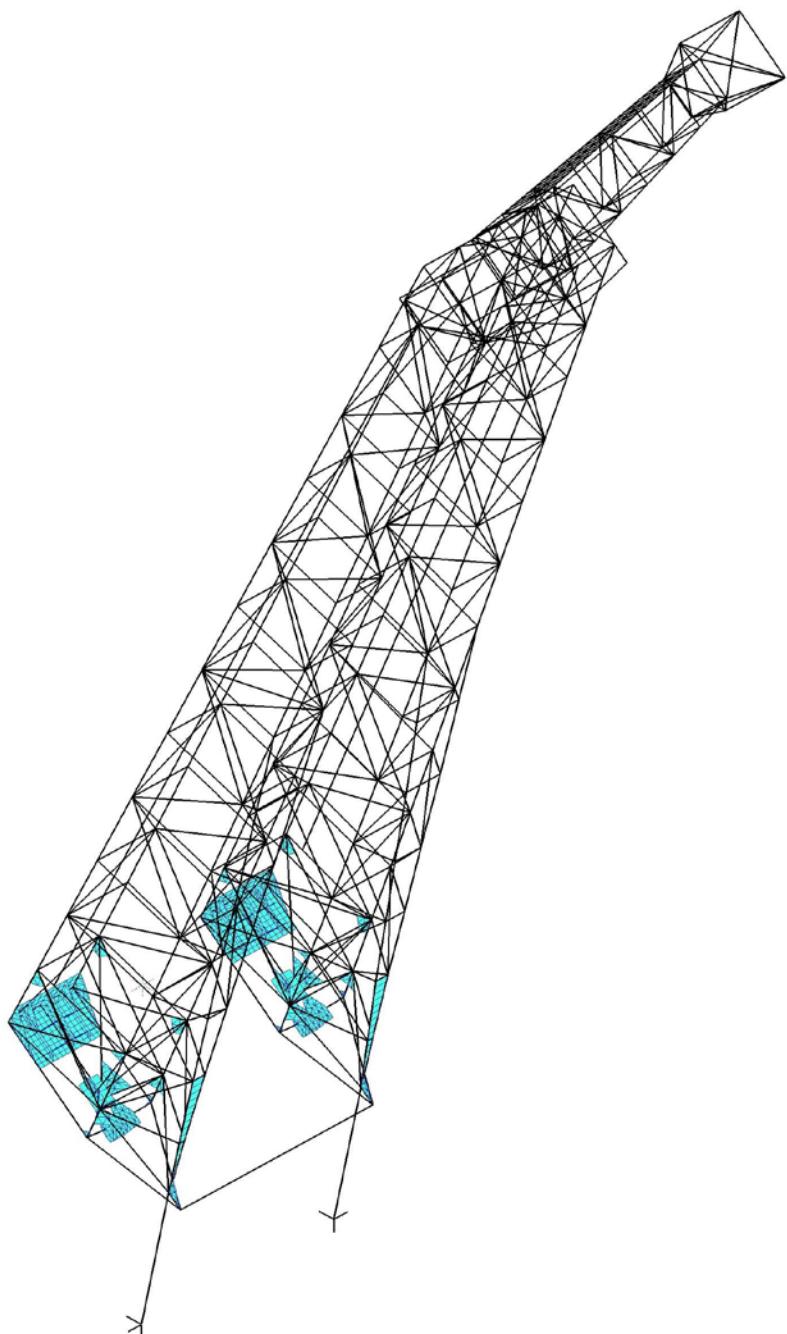


Рис. 6. Расчетная схема кабель-заправочной мачты

Результаты расчета в виде графиков изменения перемещения верхнего узла КЗМ и коэффициента запаса ее характерного элемента по времени представлены на рис. 7 и 8.

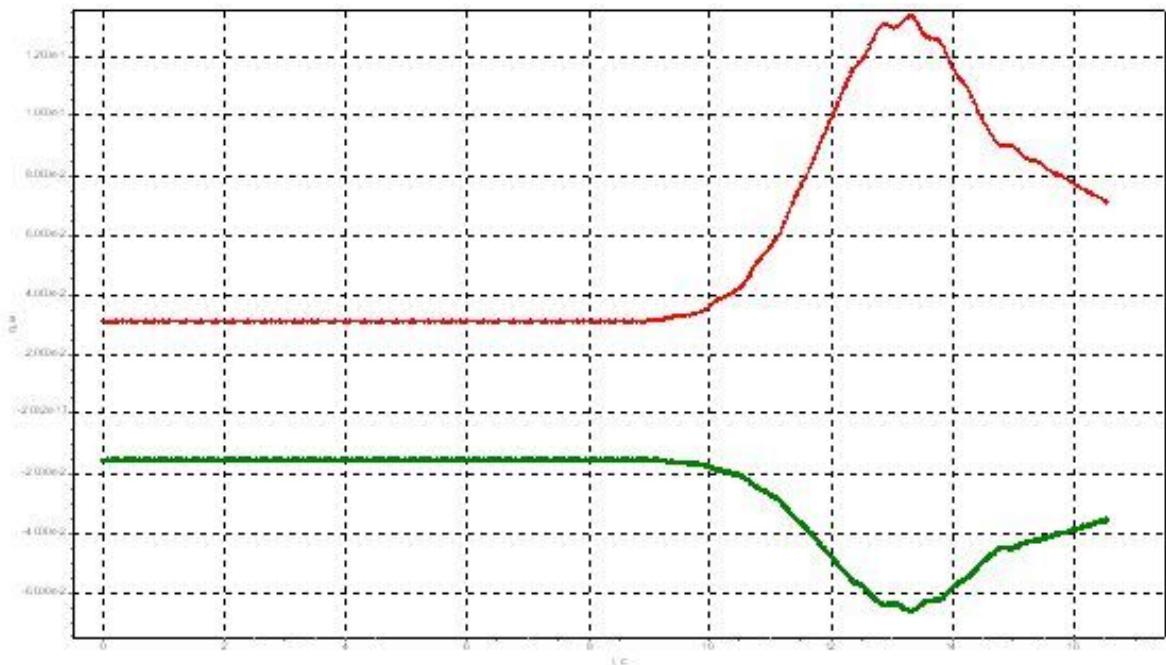


Рис. 7. Перемещения верхнего узла кабель-заправочной мачты

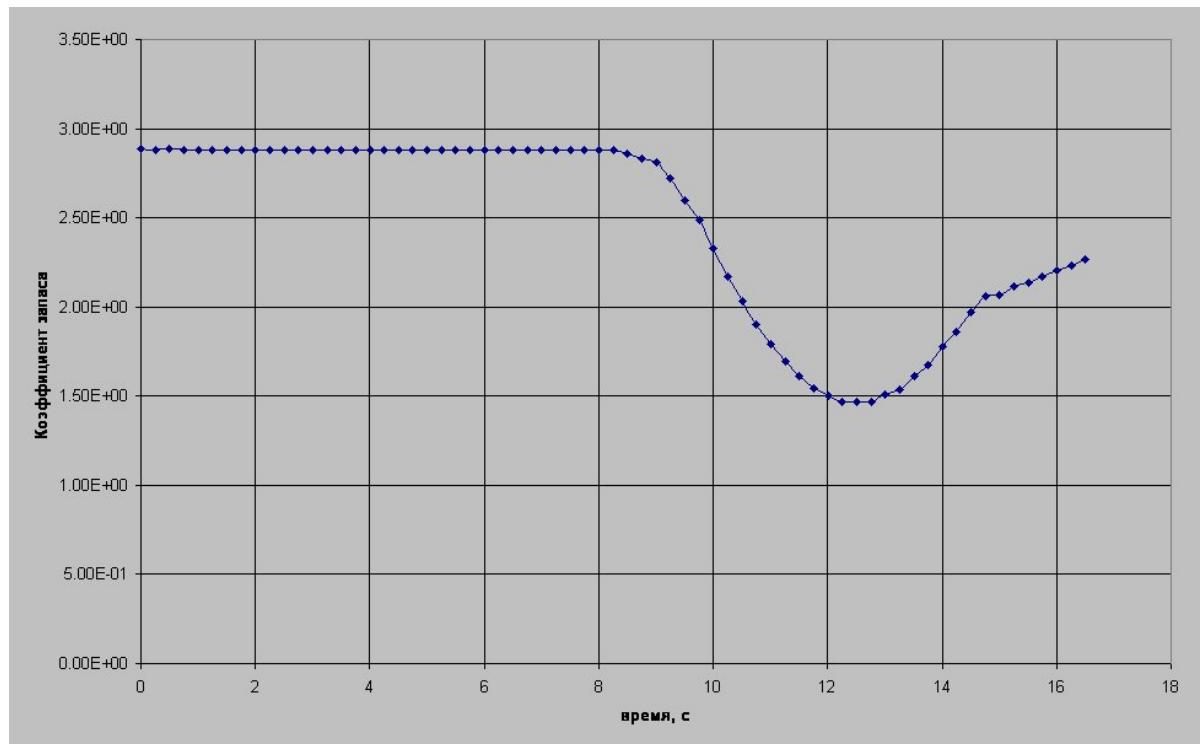


Рис. 8. Зависимость коэффициента запаса по прочности элемента кабель-заправочной мачты от времени

Приведенный подход к формированию переменных по времени и подвижных по конструкции нагрузок, вызванных газодинамической струей ДУ РКН, представляется вполне универсальным в рамках конечно-элементного моделирования и может применяться для задания других переменных по времени и месту приложения нагрузок.

## Список литературы

1. Бармин И.В., Зверев В.А., Украинский А.Ю., Языков А.В. Расчетный анализ процессов отвода конструкций стартовой системы, находящихся под воздействием струй двигателей ракеты-носителя «Союз» // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». 2011. № 1. С. 31-39.
2. Игрицкий В.А., Чугунков В.В., Языков А.В. Методика прогнозирования температур и температурных напряжений в элементах конструкций стартового оборудования при газодинамическом воздействии струй двигателей стартующей ракеты // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». 2010. Спец. выпуск. С. 53-60.
3. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 318 с.
4. Абакумов В.С., Зверев В.А., Ломакин В.В., Чугунков В.В., Языков А.В. Методический аппарат для расчетного анализа прочности конструкций стартового комплекса ракет-носителей серии «Союз» // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». 2008. Спец. выпуск. С. 124-130.
5. Соловейчик Ю.Г. Метод конечных элементов для решения скалярных и векторных задач: учеб. пособие / Ю.Г. Соловейчик, М.Э. Рояк, М.Г. Персова. Новосибирск: НГТУ, 2007. 896 с. (Сер. «Учебники НГТУ»).
6. Голованов А.П., Тюленева О.Н., Шигабутдинов А.Ф. Метод конечных элементов в статике и динамике тонкостенных конструкций. М.: Физматлит, 2006. 392 с.
7. Турчак Л.И., Плотников П.В. Основы численных методов: учеб. пособие. М.: Физматлит, 2005. 304 с.
8. Уоткинс Д.С. Основы матричных вычислений: пер. с англ. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2006. 664 с.
9. Стернин Л.Е. Основы газовой динамики. М.: Вузовская книга, 2008. 332 с.
10. ОСТ 92-9249-80. Агрегаты специального назначения. Ветровая нагрузка. М., 1980. 67 с.

# SCIENCE and EDUCATION

EL № FS77 - 48211. №0421200025. ISSN 1994-0408

electronic scientific and technical journal

---

## Simulation of variables in time and rolling load, caused by gas-dynamic influence of a space rocket propulsion pack

# 02, February 2013

DOI: [10.7463/0213.0539497](https://doi.org/10.7463/0213.0539497)

Boshnyak V.A., Zverev V. A., Ul'yanenkov A.V.

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation

[zverev\\_vadim@mail.ru](mailto:zverev_vadim@mail.ru)

[vaboshrab@mail.ru](mailto:vaboshrab@mail.ru)

The authors consider the problem of parameter representation of gas-dynamic influence of the rocket power-plant jet on structural elements of the launching system for space rockets. Vectors of nodal loads and time dependences are used for modeling this type of influence; these vectors correspond to the rocket position when moving along the calculated trajectory, while time dependences establish a connection between those vectors. The obtained results reflect time and type varying load, which is a distinct feature of this publication. This approach may be applicable for modeling other variables in time and for load point modeling.

---

Publications with keywords: [FEM](#), [launch vehicle](#), [propulsion](#), [gasdynamic exposure](#), [umbilical mast](#), [«SOYUZ»](#)

Publications with words: [FEM](#), [launch vehicle](#), [propulsion](#), [gasdynamic exposure](#), [umbilical mast](#), [«SOYUZ»](#)

---

## References

1. Barmin I.V., Zverev V.A., Ukrainskii A.Iu., Iazykov A.V. Raschetnyi analiz protsessov otvoda konstruktsii startovoi sistemy, nakhodiashchikhsia pod vozdeistviem strui dvigatelei rakety-nositelia «Soyuz» [Design analysis of processes of withdrawal of launch system structures subjected to action of rocket exhaust jets of “Soyuz” launch vehicle]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya «Mashinostroenie»* [Bulletin of the Bauman MSTU. Ser. Mechanical Engineering], 2011, no. 1, pp. 31-39.
2. Igritskii V.A., Chugunkov V.V., Iazykov A.V. Metodika prognozirovaniia temperatur i temperaturnykh napriazhenii v elementakh konstruktsii startovogo oborudovaniia pri gazodinamicheskem vozdeistvii strui dvigatelei startuiushchei rakety [Technique of predicting temperatures and temperature stresses of structure members of launch equipment under jets’ gasdynamic impact of rocket’s engines at liftoff]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya «Mashinostroenie»* [Bulletin of the Bauman MSTU. Ser. Mechanical Engineering], 2010, Special iss., pp. 53-60.

3. Zenkevich O. *Metod konechnykh elementov v tekhnike* [Finite element method in engineering]. Moscow, Mir, 1975. 318 p.
4. Abakumov V.S., Zverev V.A., Lomakin V.V., Chugunkov V.V., Iazykov A.V. Metodicheskii apparat dlia raschetnogo analiza prochnosti konstruktsii startovogo kompleksa raket-nositelei serii «Soyuz» [Methodical means for design analysis of strength of constructions of launch complex for boosters of “Soyuz” series]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seria «Mashinostroenie»* [Bulletin of the Bauman MSTU. Ser. Mechanical Engineering], 2008, Special iss., pp. 124-130.
5. Soloveichik Iu.G., Roiak M.E., Persova M.G. *Metod konechnykh elementov dlia resheniya skaliarnykh i vektornykh zadach* [The finite element method for the solution of scalar and vector problems]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2007. 896 p. (Ser. «Uchebniki NGTU» [Ser. «Textbooks NSTU»]).
6. Golovanov A.P., Tiuleneva O.N., Shigabutdinov A.F. *Metod konechnykh elementov v statike i dinamike tonkostennых konstruktsii* [The finite element method in statics and dynamics of thin-walled structures]. Moscow, Fizmatlit, 2006. 392 p.
7. Turchak L.I., Plotnikov P.V. *Osnovy chislennykh metodov* [Fundamentals of numerical methods]. Moscow, Fizmatlit, 2005. 304 p.
8. Watkins D.S. *Fundamentals of Matrix Computations*. New York, John Wiley & Sons, 2002. 633 p. (Russ. ed.: Uotkins D.S. *Osnovy matrichnykh vychislenii*. Moscow, Binom. Laboratoriia znanii, 2006. 664 p.).
9. Sternin L.E. *Osnovy gazovoi dinamiki* [Fundamentals of gas dynamics]. Moscow, Vuzovskaia kniga, 2008. 332 p.
10. OST 92-9249-80. *Agregaty spetsial'nogo naznacheniia. Vetrovaya nagruzka* [Industry Standard 92-9249-80. Units of special purpose. Wind load.]. Moscow, 1980. 67 p.